

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

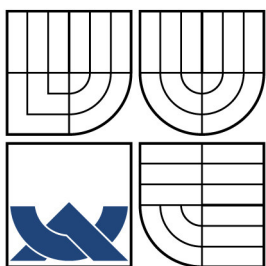
TVORBA NANOSTRUKTUR VYUŽITÍM
MIKROSKOPU AFM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ANTONÍN DOUPAL

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

TVORBA NANOSTRUKTUR VYUŽITÍM MIKROSKOPU AFM

FABRICATION OF NANOSTRUCTURES USING ATOMIC FORCE MICROSCOPY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ANTONÍN DOUPAL

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Miroslav Bartošík

BRNO 2008

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o tvorbě nanostruktur využitím mikroskopie atomárních sil. Teoretická část poskytuje stručný úvod do mikroskopie atomárních sil a lokální anodické oxidace a je založena na literární rešerši. Experimentální část je zaměřena na vyšetřování závislosti operačních parametrů (napětí mezi hrotem a vzorkem, rychlost hrotu) na rozměrech LAO nanostruktur na Si (111). Dále je na těchto oxidových nanostrukturách pozorován a analyzován selektivní růst kobaltu a galia.

Summary

This bachelor thesis deals with fabrication of nanostructures using atomic force microscopy. The theoretical part gives a brief introduction into atomic force microscopy and local anodic oxidation and it is based on literature retrieval. The experimental part is concentrated on investigation of influence of operational parameters (tip-sample voltage, speed of the tip) on dimensions of LAO nanostructures on Si(111). Further the selective growth of cobalt and gallium on such oxide nanostructures is observed and analysed.

Klíčová slova

LAO, AFM, Nanolitografie, Si(111), Co, Ga

Keywords

LAO, AFM, Nanolithography, Si(111), Co, Ga

DOUPAL, A. *Tvorba nanostruktur využitím mikroskopu AFM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Bartošík.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Bartošíkovi za pomoc při ovládnutí mikroskopu AFM a za pomoc při řešení problémů týkajících se výroby nanostruktur. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Miroslavu Kolíbalovi a Ing. Jindřichu Machovi za přípravu vzorků.

Děkuji své rodině za poskytnutí zázemí při studiu na Fakultě strojního inženýrství.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Bartošíka. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Přerově dne 21. května 2008

.....
podpis

Obsah

ÚVOD	3
1 RASTROVACÍ SONDOVÉ MIKROSKOPIE	5
1.1 Rastrovací sondová mikroskopie	5
1.1.1 Princip činnosti SPM.....	5
1.2 AFM	6
1.2.1 Konstrukce AFM.....	6
1.2.2 Interakce mezi povrchem vzorku a hrotem	7
1.2.3 Kontaktní mód AFM	9
1.2.4 Bezkontaktní mód AFM	10
1.2.5 Poklepový mód AFM	12
1.2.6 Mikroskopie laterálních sil	12
2 NANOLITOGRAFIE POMOCÍ SPM	13
2.1 Lokální anodická oxidace.....	13
3 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY	17
3.1 Vytváření oxidových nanostruktur na Si(111)	17
3.2 Selektivní růst Co a Ga na oxidových nanostrukturách na Si(111).....	21
ZÁVĚR	27
DODATKY	29
LITERATURA	31

ÚVOD

Zmenšování nejen elektrotechnických součástí v dnešní době dospělo do stadia, kdy se jejich rozměry pohybují pod hranicí 100 nm. Pokud má současný trend miniaturizace pokračovat, je zapotřebí vyvinout nové metody a nové techniky výroby těchto struktur v nanometrickém měřítku. Současná klasicky využívaná optická litografie již totiž dosahuje svých limitních omezení¹.

V případě, kdy alespoň jeden rozměr je menší než 100 nm a umožňuje přímou kontrolu fyzikálních a chemických vlastností, mluvíme o tzv. nanotechnologiích. Tento neustále se rozšiřující vědní obor v sobě spojuje různé vědní disciplíny, jako jsou fyzika, biologie, chemie či materiálové inženýrství. Rastrovací sondové mikroskopie – SPM (z angl. *Scanning Probe Microscopy*) se ukázaly jako výtečný nástroj pro studium povrchů vzorků s rozlišením až na atomární úroveň. Dále se tato metoda osvědčila jako vhodný nástroj pro tvorbu nanostruktur na různých površích.

Tato bakalářská práce se týká právě přípravy nanostruktur pomocí AFM (z angl. *Atomic Force Microscopy*). Jedná se o práci, která má za úkol studovat využití mikroskopu AFM při přípravě nanostruktur, a to především pomocí metody lokální anodické oxidace. Tato práce se však nezabývá pouze touto metodou, ale i dalšími možnostmi přípravy nanostruktur pomocí mikroskopu AFM a dále topografickými vlastnostmi vyoxidovaných struktur.

Veškeré vyoxidované struktury, o kterých tato práce pojednává, byly vyrobeny a následně vyhodnocovány pomocí mikroskopu AutoProbe CP-R od firmy Veeco. Tento mikroskop byl v roce 2002 zakoupen na Ústav fyzikálního inženýrství (ÚFI), Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Jedná se o komplexní zařízení pracující v atmosférických podmínkách a umožňuje využívat velké množství technik rastrovacích sondových mikroskopií.

První kapitola pojednává o SPM mikroskopii, zvláště pak o AFM, která je založena na principu silové interakce sondy s povrchem zkoumaného vzorku. Tato kapitola se také ve stručnosti zabývá základními módy AFM spolu s jejich fyzikálními a technickými principy. Tématem druhé kapitoly je popis litografických metod využívajících elektrického pole. Třetí kapitola shrnuje experimentální výsledky, kterých bylo dosaženo při lokální anodické oxidaci na Si(111) a při studiu selektivního růstu Ga a Co na rozhraní Si(111)/SiO_x.

¹ V současnosti se rozměry objektů vytvářených pomocí optické litografie pohybují kolem 40 nm.

Kapitola 1

Rastrovací sondové mikroskopie

1.1 Rastrovací sondová mikroskopie

Rastrovací sondovou mikroskopií, známou pod zkratkou SPM (z angl. *Scanning Probe Microscopy*), se souhrnně označují mikroskopie, kterými jsou získávány informace o topografii nebo jiných specifických vlastnostech vzorku. Společným znakem těchto mikroskopií je využití interakce sondy s povrchem daného vzorku. Tyto druhy mikroskopií se vyznačují vysokým až atomárním rozlišením.

V průběhu posledních let se SPM techniky rozšířily z několika málo specializovaných laboratoří do prakticky všech institucí zabývajících se fyzikou pevných látek či fyzikou povrchů a tenkých vrstev.

1.1.1 Princip činnosti SPM

Získávání informací o povrchu a jeho lokálních vlastnostech je často prováděno metodami SPM. Metody SPM obecně využívají hrotu (angl. *tip*) s poloměrem řádově desítek nanometrů. Různé interakce zkoumaného povrchu s hrotem pak dovolují zkoumat daný povrch či tenkou vrstvu. Aby nastala vzájemná interakce sondy se zkoumaným povrchem, a bylo tak možné sledovat požadované vlastnosti, je nutné uvést hrot do kontaktu se vzorkem, resp. do vzdálenosti několika jednotek nanometrů od povrchu, a zároveň přitom pohybovat s hrotem (vzorkem) v rovině rovnoběžné s povrchem.

SPM mikroskopie mají, jak již bylo uvedeno výše, tu vlastnost, že dosahují velmi vysokých rozlišovacích schopností, a to až na úroveň jednotek angströmů. Takovýchto rozlišení je dosaženo při použití velmi ostrých hrotů s malým vrcholovým poloměrem a také pomocí přesného řízení pohybu vzorku vůči hrotu. Tyto velmi jemné posuvy jsou realizovány piezoelektrickými elementy.

Podle druhu interakce povrchu vzorku se skenovacím hrotem se rozlišují tyto odlišné metody zobrazování:

- Mikroskopie magnetických sil (*Magnetic Force Microscopy* - MFM),
- Rastrovací tunelování mikroskopie (*Scanning Tunneling Microscopy* - STM),
- Rastrovací mikroskopie blízkého pole (*Scanning Near-field Optical Microscopy* - SNOM),
- Mikroskopie elektrostatických sil (*Electrostatic Force Microscopy* - EFM),
- Spinová rastrovací tunelová mikroskopie (*Spin Polarized STM* - SP-STM),

- Mikroskopie atomárních sil (*Atomic Force Microscopy* - AFM).

Výše uvedené metody zobrazování však nejsou veškeré existující. SPM mikroskopie jsou dynamicky se rozšiřující oblastí zobrazovacích metod a v důsledku toho vznikají stále nové modifikace [1, 2].

Metody MFM, AFM a EFM jsou založeny na silové interakci mezi hrotem a zkoumaným vzorkem a patří tedy mezi metody SFM (*Scanning Force Microscopy*).

V této práci je využívána metoda AFM, a to nejen k zobrazování povrchů, ale i k lokální anodické oxidaci (*Local Anodic Oxidation* - LAO) a následné analýze vyoxidovaných nanostruktur.

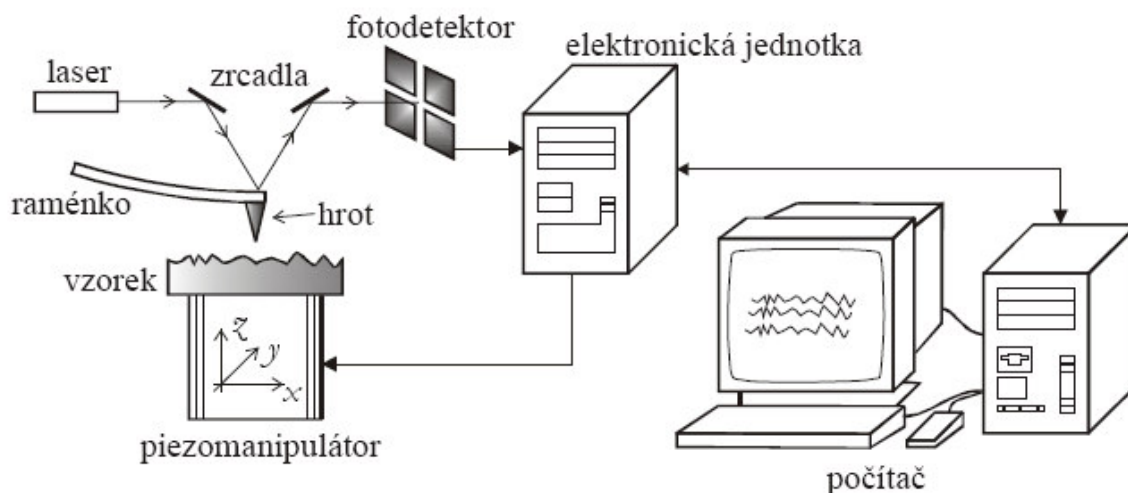
1.2 AFM

AFM mikroskopie je jednou z nejrozšířenějších metod z oblasti SPM mikroskopii. Tato metoda byla poprvé představena v roce 1986 týmem tvořeným Binnigem, Quatem a Gerberem. Ti ve výzkumných laboratořích IBM ve Švýcarsku v Zürichu pozorovali parazitní odpuzování (přitahování) při STM analýze povrchu vzorku [3].

Metoda AFM je nejvíce používanou metodou SPM, protože může být použita i na nevodivé vzorky nebo dokonce i vzorky živých buněčných organismů. Dalšími výhodami této metody je relativně vysoká zobrazovací rychlost a relativní nenáročnost na čistotu povrchu zkoumaného vzorku.

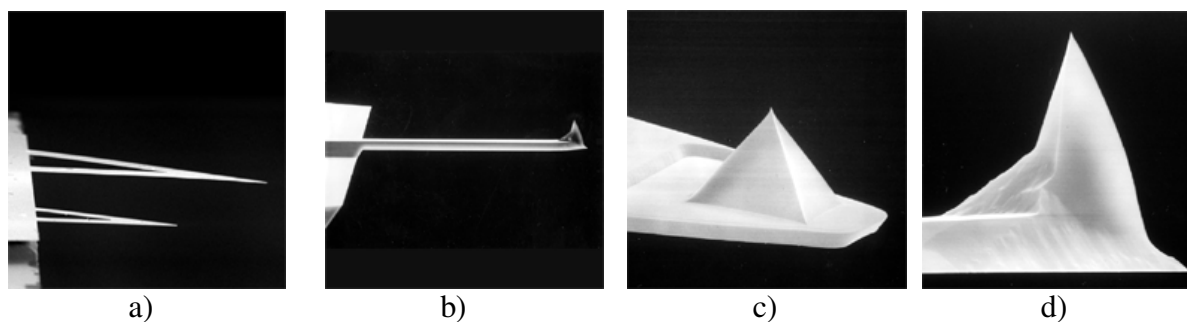
1.2.1 Konstrukce AFM

Na obr. 1.1 je znázorněno jedno z možných konstrukčních uspořádání mikroskopu AFM. Na rozdíl od STM tato metoda detekuje změny atomárních sil mezi hrotem a povrchem zkoumaného vzorku, který je umístěn na držáku skládajícího se z několika piezoelementů. Tyto elementy umožňují pohyb vzorku vůči sondě. Změny silových poměrů mezi hrotem a zkoumaným vzorkem nutí elastické raménko odchylovat se z rovnovážné polohy. Tyto odchylky jsou pak detekovány pomocí laserového svazku, který je ze zdroje (laserová dioda $\lambda = 600 \div 700$ nm s výstupním výkonem 0,2 mW [5]) směřován na raménko pomocí nastavitelného zrcátka. Laserový paprsek se od tohoto raménka odráží a pomocí dalšího nastavitelného zrcátka je pak směřován ke čtyřsegmentovému fotodeketoru (PSPD). Změny elektrického signálu, které jsou získávány z dopadů fotonů laserového světla na fotodiodu, jsou pak využívány ke zpětnovazebním korekcím a k získávání informací o samotné struktuře povrchu zkoumaného vzorku.



Obrázek 1.1: Schéma uspořádání AFM [4].

Hrot se nachází na konci pružného raménka, které je trojúhelníkového nebo obdélníkového tvaru (obr. 1.2). Samotná raménka jsou integrována na nosné destičce pro snadnější manipulaci. Parametry těchto destiček jako délka, šířka, tloušťka a také vlastní parametry samotného hrotu jako rezonanční frekvence ($1 \div 1000$ kHz) či tuhost ($10^{-4} \div 10^1$ N/m), většinou udává výrobce AFM sond. Hrot má pyramidový nebo kónický tvar a je většinou vyroben z nitridu křemíku (Si_3N_4), oxidu křemíku (SiO_2) nebo diamantu. Na hrot je pak možné nanášet různé vrstvy pro zlepšení vodivosti nebo magnetických či mechanických vlastností. Tyto nanášené vrstvy mohou být z TiN, Au, Pt, Co, atd. Neméně důležitými údaji o hrotech jsou pak jejich tvarové vlastnosti jako poloměr křivosti vrcholů hrotů ($1 \div 100$ nm) a vrcholový úhel kužele, popř. jehlanu ($10^\circ \div 30^\circ$).



Obrázek 1.2: Ukázky různých ramének a hrotů zobrazených pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu: a) trojúhelníkový typ raménka, b) obdélníkový, c) pyramidový tvar hrotu, d) kónický tvar hrotu

1.2.2 Interakce mezi povrchem vzorku a hrotem

Popis interakce mezi hrotem a povrchem zkoumaného vzorku není jednoduchý. Při této interakci působí vždy několik typů sil současně. Výsledná interakce závisí nejen na použitých materiálech, ze kterých je zhotoven hrot a zkoumaný vzorek, ale svůj vliv zde má také geometrie hrotu. Obecně můžeme tedy síly, které působí mezi povrchem zkoumaného vzorku

a hrotem, rozdělit na van der Waalsovy síly, magnetické síly a elektrostatické síly. Můžeme mezi ně ale zahrnout i síly způsobené iontovou a kovalentní vazbu.

Počátkem 20. století bylo zjištěno, že nelze jednoduše teoreticky odvodit vztah, který by popisoval vzájemné působení mezi jednotlivými atomy nebo molekulami. Proto byla snaha hledat spíše semiempirické vztahy. Roku 1903 Mie navrhl jedno z možných vyjádření interakčního potenciálu dvou atomů (resp. molekul), které má tvar [7]

$$w(r) = -\frac{A}{r^n} + \frac{B}{r^m}, \quad (1.1)$$

kde A a B jsou kladné konstanty, které jsou charakteristické pro danou interakci, r představuje vzdálenost mezi atomy a m, n jsou přirozená čísla, která vyjadřují účinnost interakce dané soustavy. Ve vztahu (1.1) je zahrnuta nejen interakce přitažlivá, která je vyjádřena záporným členem, ale i interakce odpudivá, která je popsána členem kladným.

Speciálním případem potenciálu, který popsal Mie, je tzv. Lennard-Jonesův potenciál. Ten je dán celkovou potenciální energií odpudivé i van der Waalsovy síly a má tvar [8]

$$w(r) = 4w_0 \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right], \quad (1.2)$$

kde minimální energie potenciálu w_0 se nachází v bodě $r = 1,12\sigma$. V případě, kdy $r = \sigma$, je tento potenciál roven nule. Interakční síla odvozená z rovnice (1.2) je pak záporně vzatou derivací potenciálu podle r . Výsledný vztah pro interakční sílu je tedy dán vztahem [8]

$$F(r) = 24w_0 \left(\frac{2\sigma^{12}}{r^{13}} - \frac{\sigma^6}{r^7} \right). \quad (1.3)$$

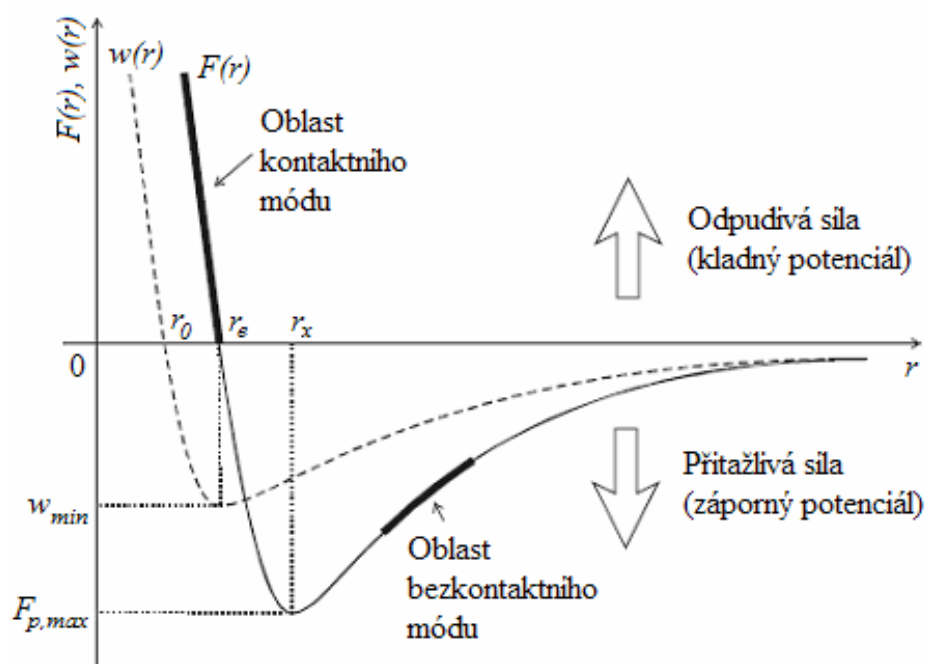
Tato síla má dvě složky: složku odpudivou $\sim r^{-13}$ a složku přitažlivou $\sim r^{-7}$.

a) Přitažlivá složka síly

Podstatou přitažlivé složky interakce je tzv. van der Waalsova polarizační síla, jejíž vzdálenost dosahu se pohybuje v rozmezí od 2 Å do 1000 Å. Tato síla vzniká v důsledku nehomogenního rozložení hustoty elektrického náboje v atomu, resp. molekule. Tato nehomogenita vede k vytvoření dipólového momentu v sousedním atomu, resp. molekule, a ke vzniku přitažlivé polarizační síly.

b) Odpudivá složka síly

Odpudivá interakce lze vysvětlit pomocí Pauliho vylučovacího principu, protože tato interakce má čistě kvantově-mechanický charakter. Podle Pauliho vylučovacího principu nemohou mít dva elektrony stejnou sadu kvantových čísel. Při přiblížení dvou atomů dojde k překrytí jejich elektronových obalů a některé elektrony tedy musí přejít do stavu s vyšší energií. Tento přechod elektronů do vyšších energetických stavů pak vyvolává odpudivou složku síly.



Obrázek 1.3: Závislost Lennard-Jonesova interakčního potenciálu w a síly F na vzdálenosti r mezi dvěma částicemi (atomy) [4].

Na obrázku 1.3 je znázorněn průběh potenciálu $w(r)$ a interakční síly $F(r)$, které působí mezi dvojicí atomů, resp. molekul. Křivka síly nad osou r představuje výslednou odpudivou sílu a křivka síly pod osou r znázorňuje sílu přitažlivou. Z průběhu grafu můžeme říci, že odpudivá síla pro hodnoty r jdoucí zleva k r_e velmi rychle klesá k nule. Proto se tato síla nazývá silou krátkého dosahu. Naproti tomu van der Waalsova síla, která působí poměrně na velké vzdálenosti, je nazývána silou dlouhého dosahu. Ve vzdálenosti r_e , kde interakční potenciál dosahuje svého minima, jsou jak odpudivé, tak i přitažlivé síly v rovnováze, a tedy výsledná síla je zde nulová.

Ve skutečnosti však není špička hrotu tvořena jediným atomem, ale množstvím atomů. Tvar konce hrotu se proto charakterizuje poloměrem křivosti, jak již bylo zmíněno výše. V dosahu interakčního potenciálu na sebe tedy nepůsobí jen dva nejbližší atomy, ale i blízké okolí sousedících atomů. Výsledná síla je potom dána součtem všech sil od jednotlivých atomů, které se na interakci podílejí. Podle výpočtů a zkušeností [9] k oboustranné interakci významně přispívají pouze první tři až čtyři vrstvy atomů hrotu a povrchu zkoumaného vzorku.

1.2.3 Kontaktní mód AFM

V kontaktním módu (C-AFM) je hrot v přímém kontaktu s povrchem zkoumaného vzorku tak, že působí mezi hrotem a povrchem výsledná odpudivá interakce, jak je znázorněno na obrázku 1.3 na křivce vlevo. Celková síla, která působí mezi hrotem a povrchem se pohybuje řádově v rozmezí $10^{-6} \div 10^{-8}$ N. Při této zobrazovací metodě je vhodné použít raménko s malou tuhostí, aby nebyla zobrazovaná topografie zkreslena rytím hrotu do měkkého vzorku, protože odpudivé silové působení je poměrně velké. I přesto je použití kontaktního módu omezeno na relativně tvrdé povrchy. Velikost síly, kterou působí hrot na povrch zkoumaného vzorku, lze stanovit z Hookova zákona a vyjádření má tvar [8]

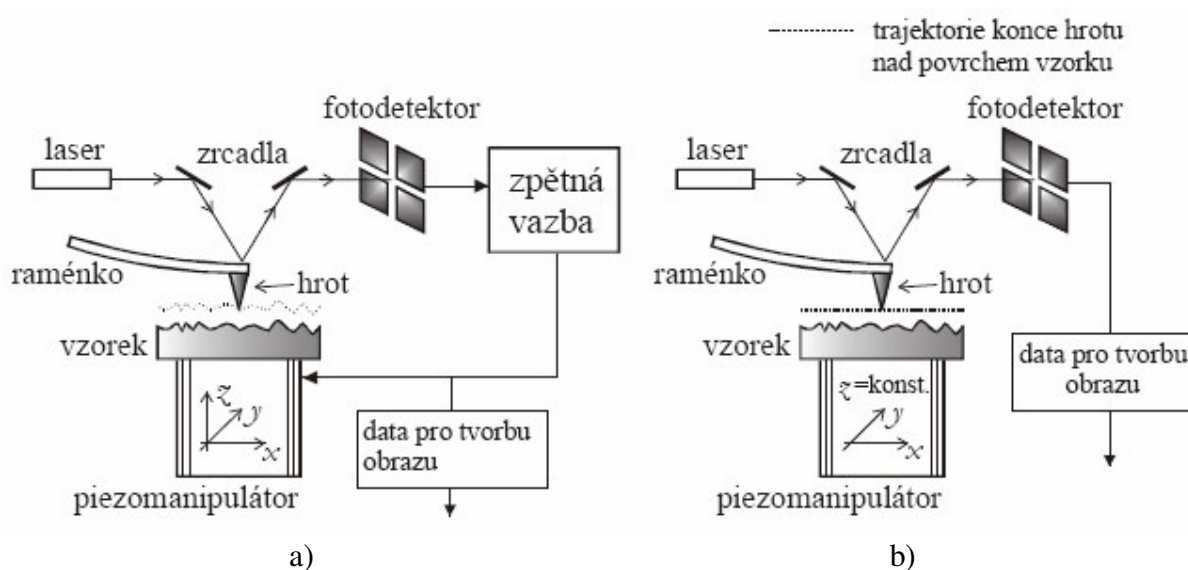
$$F_z = k\Delta z, \quad (1.4)$$

kde k je tuhost raménka a Δz výchylka konce raménka z rovnovážné polohy.

K zobrazení topografie povrchu je možné využít dva AFM módy. Jedním z těchto módů je režim konstantní síly, tím druhým režim konstantní výšky.

Režim konstantní síly

Tento režim (obr. 1.4a) se typicky využívá k zobrazování velkých ploch nebo vzorků s větší povrchovou nerovností. Pomocí zpětné vazby, která udržuje konstantní prohnutí raménka, jsou získávány informace o topografii zkoumaného povrchu. Potřebnou přitlačnou sílu určuje operátor. Zpětná vazba kontroluje z -ovou pozici vzorku vzhledem k hrotu tak, aby síla byla udržována na konstantní úrovni. Zpětnovazební signál je použit při generování obrázku topografie.



Obrázek 1.4: a) Princip činnosti AFM v režimu konstantní síly. b) Princip činnosti AFM v režimu konstantní vzdálenosti od povrchu vzorku.

Režim konstantní výšky

Režim konstantní výšky (obr. 1.4b) je rychlý (v důsledku vypnuté zpětné vazby) a vhodný pro atomárně hladké povrchy (kde nehrozí ulomení raménka při vypnutí zpětné vazby), ale má (resp. je schopen dosahovat) stejného rozlišení jako režim konstantní síly. Samotné generování obrázku s topografií je prováděno pomocí změn ohnutí raménka.

1.2.4 Bezkontaktní mód AFM

V bezkontaktním módu (NC-AFM) je hrot držen ve větší vzdálenosti (přibližně $50 \div 100 \text{ \AA}$) nad povrchem vzorku. Působí na něj tedy přitažlivé síly od povrchu vzorku (obr. 1.3). Tyto síly jsou ve skutečnosti velmi malé (řádově 10^{-9} N) [10]. Nejsou však dostatečné natolik, aby mohly přitáhnout hrot na raménku k povrchu vzorku. Proto se používá ramének s malou tuhostí. Ta jsou nad povrchem vzorku rozkmitána na frekvenci blízkou jejich rezonanční frekvenci. Tyto frekvence se pohybují v rozmezí $100 \div 400 \text{ kHz}$ s amplitudami $10 \div 100 \text{ nm}$ [10]. Silová interakce mezi vzorkem a hrotem mění efektivní rezonanční frekvenci

raménka a amplitudu kmitání. A právě tyto změny slouží k zobrazení povrchu zkoumaného vzorku.

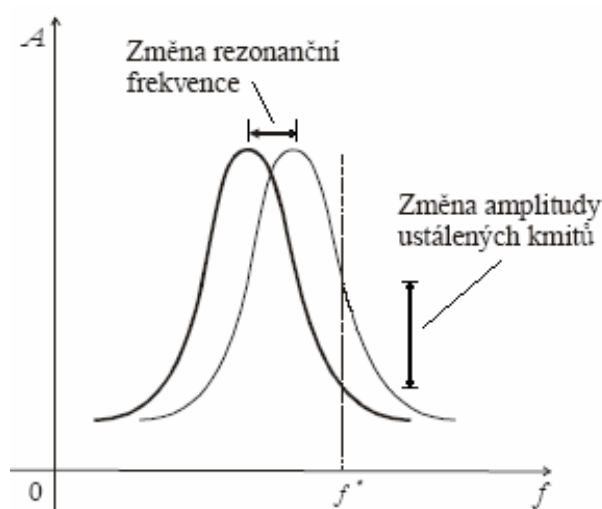
Souvislost mezi efektivní rezonanční frekvencí raménka a změnami topografie vzorku se dá popsat následujícím způsobem. Velikost efektivní rezonanční frekvence raménka v blízkosti povrchu zkoumaného vzorku je možné vyjádřit ve tvaru [10]

$$\omega_R = \sqrt{\frac{k_{ef}}{m}}, \quad (1.5)$$

kde m je hmotnost raménka a k_{ef} je efektivní tuhost raménka, která vyjadřuje tuhost raménka v poli nelineárních sil v blízkosti povrchu zkoumaného vzorku. Efektivní tuhost raménka k_{ef} se dá dále vyjádřit pomocí vztahu [10]

$$k_{ef} = k - \frac{\partial F}{\partial r}, \quad (1.6)$$

kde k reprezentuje vlastní tuhost raménka, r je vzdálenost mezi hrotem a povrchem zkoumaného vzorku a $\partial F / \partial r$ představuje gradient síly, která působí na hrot při interakci s povrchem. Z obrázku 1.3 je zřejmé, že v bezkontaktní vzdálenosti gradient $\partial F / \partial r$ při přibližování hrotu k povrchu zkoumaného vzorku narůstá, a z výše uvedených vztahů (1.5) a (1.6) pak plyne, že se efektivní tuhost raménka snižuje a v důsledku toho klesá i jeho efektivní rezonanční frekvence, kterou je možné detekovat a tak získat informaci o topografii nebo silovém působení mezi hrotem a vzorkem (obr. 1.5).



Obrázek 1.5: Závislost amplitudy na frekvenci při změně rezonanční frekvence ve dvou různých vzdálenostech hrotu od povrchu zkoumaného vzorku.

Velkou výhodou NC-AFM je jeho malé silové působení mezi hrotem a povrchem a žádný kontakt s jeho povrchem. Díky této relativně malé silové interakci můžeme zkoumat velmi měkké, elastické povrchy či povrchy citlivé na otěr nebo poškrábání.

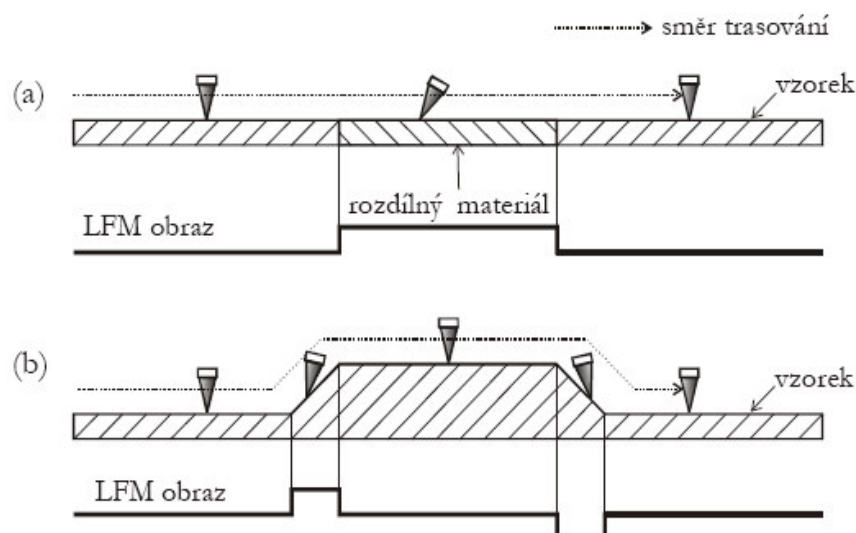
1.2.5 Poklepový mód AFM

Tento mód (z angl. tapping mode, semicontact mode nebo intermittent-contact) je speciální variantou NC-AFM metody. Tento mód pracuje také na principu, kdy je raménko s hrotem rozkmitáno na své rezonanční frekvenci s amplitudou $10 \div 1000$ nm [3]. Na rozdíl od NC-AFM metody, je však hrot umístěn do větší blízkosti k povrchu zkoumaného vzorku, než činí jeho amplituda, a tak se hrot dostává do kontaktu se vzorkem. V tomto módu jsou výsledné interakce hrotu zapříčiněny nejen topografií, ale i mechanickou elasticitou povrchu vzorku. Tyto vlivy pak mají přímý vliv na amplitudu a fázi oscilací, ze kterých je pak vytvořen výsledný obraz.

Velkou výhodou tohoto módu je to, že na hrot nepůsobí žádné třecí síly. Pokud však analyzujeme měkké a elastické povrchy, začínají se při tomto módu projevovat deformace.

1.2.6 Mikroskopie laterálních sil (LFM)

Při kontaktním módu je možno také současně s topografií sledovat laterální síly působící na hrot a pracovat tak v tzv. mikroskopii laterálních sil – LFM (z angl. *Lateral Force Microscopy*). Při této zobrazovací metodě se detekuje zkroucení raménka vlivem sil působících na hrot rovnoběžně s povrchem zkoumaného vzorku (obr. 1.6). Měření laterálních sil je citlivé nejen na změny třecích sil mezi hrotem a samotným vzorkem, ale také na změny sklonu povrchu vzorku. Pro odlišení těchto dvou efektů se používá souběžné měření vertikálního vychýlení raménka (C-AFM) a jeho zkroucení (LFM). Další možností je nasnímání dvou obrázků topografie pro opačné směry rastrování. Tuto metodu lze výhodně využít pro zobrazení změn v povrchovém tření. Tato tření jsou důsledkem nehomogenity materiálu, který tvoří povrchovou vrstvu. Dále lze tento mód s výhodou použít pro získání obrazu hran nerovností povrchu s vysokým kontrastem.



Obrázek 1.6: Změna zkroucení raménka s hrotem vlivem rozdílného tření (a) a topografie (b) [4].

Kapitola 2

Nanolitografie pomocí SPM

SPM je díky svému vysokému rozlišení velmi slibnou metodou nejen pro studium nanostruktur, ale také pro jejich tvorbu. Optická litografie, jejíž rozlišení je omezeno vlnovou délkou světla, se již v současné době blíží ke svým fyzikálním limitům (v současnosti kolem 40 nm [27]). Jednou z podmínek při vytváření nanostruktur je totiž skutečnost, že alespoň jeden rozměr vytvořené struktury musí být menší než 100 nm. Proto se v poslední době klade stále větší důraz na zavádění nových metod pro tvorbu stále menších zařízení a vzorů v nanometrovém měřítku. Jedním z možných řešení by mohla být právě SPM litografie, protože splňuje přísné kritérium o velikosti nanostruktur uvedené výše. Je s ní totiž možné dosáhnout takového rozlišení, které překonává standardy ostatních litografických metod.

Nanostruktury lze vytvářet dvojím způsobem. Jedním z nich je proces, který se označuje anglickým názvem *top-down*, kdy se menší celky vytvářejí pomocí větších celků. Druhý postup spočívá v tom, že se z menších částí (atomy, molekuly) vytvářejí celky větší. Tento proces je označován jako *bottom-up* [4].

AFM lze použít k tvorbě nanostruktur a modifikaci povrchu a to pomocí těchto dvou způsobů:

- Pomocí elektrického pole.
- Silovým působením hrotu na povrch vzorku.

Pomocí elektrického pole U této metody dochází nejen k topografickým změnám povrchu, ale i k elektrochemickým změnám. Tyto změny vznikají v důsledku přiložení jistého napětí mezi daný vzorek a hrot AFM. Díky velmi malé vzdálenosti (jednotky nm) a přiloženého napětí mezi vzorkem a hrotem se začne vytvářet vrstvička oxidu. Tento proces využívá metoda lokální anodické oxidace (LAO).

Silové působení hrotu na povrchu vzorku U této metody dochází pouze k topografickým změnám povrchu v důsledku silového působení hrotu. Tyto změny jsou vytvářeny pomocí velmi tvrdého hrotu, který je vtlačěn do relativně měkkého materiálu. Jednou z mnoha možností je například rytí hrotem do vzorku.

I když byla demonstrována celá řada SPM nanolitografických metod, všechny jsou stále ve svém ranném stádiu vývoje.

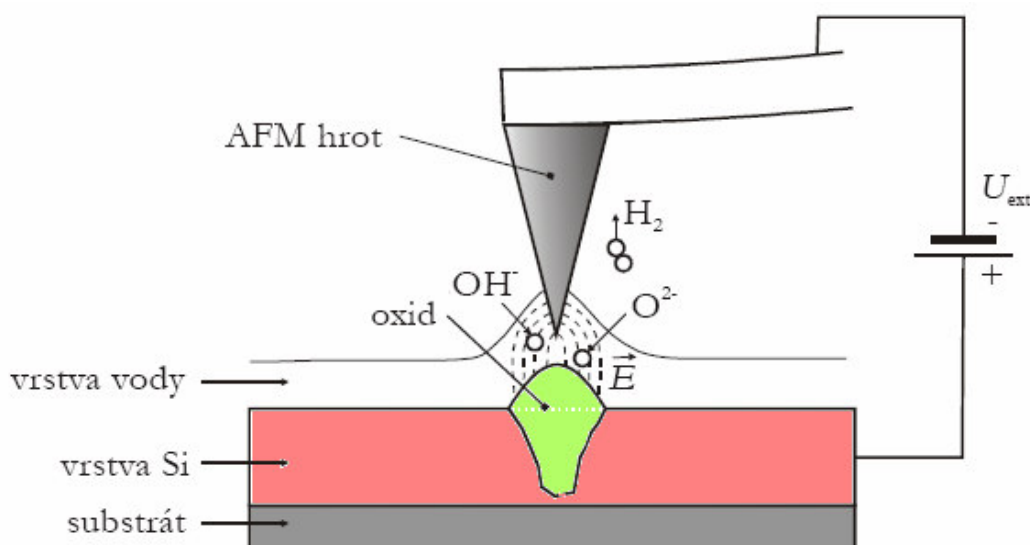
2.1 Lokální anodická oxidace

Lokální anodická oxidace (LAO) patří mezi techniky, které k vytváření nanostruktur používají elektrické pole. Poprvé byla představena v roce 1990 týmem J. A. Dagaty [11]

s využitím STM na pasivovaném² Si(111) typu N za atmosférických podmínek. Podobné chování lze však pozorovat i s využitím AFM. Výhoda AFM spočívá v tom, že dokáže zobrazit i nevodivý povrch (tedy oxid). V případě STM proud z oxidace ovlivní tunelovací proud, a tak je ztracena informace o topografii.

LAO metoda se široce aplikuje na výrobu oxidových struktur kovů, polovodičů a dalších materiálů. Díky intenzivnímu výzkumu je možné vytvářet poměrně přesně složité struktury jako *Metal Oxide Semiconductor* - MOS tranzistory [13]. V dnešní době je totiž možné tento proces řídit rychlostí pohybu hrotu, velikostí přiloženého napětí, povrchovou vodivostí substrátu [14] nebo tenké vrstvy vyrobené na jeho povrchu. Dalšími možnostmi, jak ovlivňovat oxidační proces, je změna atmosférických podmínek či zaostření hrotu.

Podstatou LAO je chemická reakce zapříčiněná vysokou elektrickou intenzitou mezi vzorkem a hrotem. Tato oxidace probíhá pouze za atmosférických podmínek, proto vodní vlhkost adsorbuje³ na povrchu vzorku. Po přiblížení hrotu k povrchu vzorku, na kterém chceme vytvořit požadované struktury, pak vytvoří voda mezi hrotem a povrchem vzorku vodní meniskus. Jelikož je molekula vody silně polární, dochází v důsledku vysoké elektrické intenzity ($10^8 \div 10^{10}$ V/m) mezi hrotem a vzorkem k disociaci (rozštěpení) molekuly vody na ionty. Záporné ionty OH^- a O^{2-} jsou pak vlivem vysoké elektrické intenzity přitahovány směrem k povrchu vzorku, kde chemicky reagují s povrchem a vytvářejí tak oxid a plynný vodík H_2 . Ten pak volně odchází do prostoru.



Obrázek 2.1: Princip LAO při kterém dochází k disociaci molekul vody v důsledku velké elektrické intenzity.

Analytický model oxidace

První kvantitativní model oxidace tenkých vrstev pomocí iontové difúze O^{2-} a OH^- navrhli Gordon a kol. (přesná povaha difúze však v té době nebyla známa) [12]. Návrh spočíval v difúzi iontů přes oxidovou vrstvu k rozhraní křemík – oxid křemíku. Rozdílná napětí

² Pasivace je samovolná nebo řízená tvorba ochranné vrstvy na povrchu pevné látky, která zabraňuje oxidaci (korozi) povrchu dané látky. Pasivovaný povrch je nereaktivní a hydrofobní (odpuzující vodu).

³ Adsorpce je separační proces, kdy se plynné látky usazují na povrchu pevné látky ve velmi tenké vrstvičce.

vytvořená mezi absorbovanou vrstvou iontů a zoxidovanou vrstvou se nazývá Mottův potenciál U_0 . Díky němu vzniká elektrické pole, které podporuje difúzi. Kvantitativní analýza je odvozená z teorie Cabrery a Motta a je upravena pro oxidaci tenkých vrstev.

Elektrické pole je tak velké, že driftová rychlost iontů není úměrná elektrickému poli. Pokud W je intersticiální energie potřebná pro difúzi (W v sobě zahrnuje aktivační energii pro difúzi spolu s počáteční energií potenciální bariéry o šířce $2a'$ mezi intersticiálními polohami), pak je možné ukázat, že růst oxidu je dán vztahem [12]

$$\frac{dh}{dt} = u \exp \frac{h_1}{h}, \quad (2.1)$$

kde [12]

$$h_1 = \frac{qa'U}{kT}, \quad (2.2)$$

kde q je elementární náboj, $U = U_0 + U_{ext}$ je součet Mottova potenciálu a přiloženého napětí mezi hrotem a povrchem vzorku, k je Boltzmanova konstanta, T je teplota a u je pak dáno vztahem [12]

$$u = u_0 \exp\left(\frac{-W}{kT}\right), \quad (2.3)$$

kde u_0 je řádově 10^4 cm/s.

Rovnice (2.1) je platná pouze pro $h \ll h_L$, kde h_L se řádově pohybuje v několika nm. Z toho je zřejmé, že rychlost růstu oxidové vrstvy je velká pro malé výšky oxidu h rovnice (3.1). Pokud výška oxidu překročí maximální hodnotu h_L , pak elektrické pole poté již další oxidaci nevyvolá. To odpovídá poklesu elektrického pole pod hodnotu $E_L = 10^7$ V/m. Lze tak dojít ke vztahu pro maximální výšku oxidu [12]

$$h_L = \frac{U}{E_L}. \quad (2.4)$$

Řešení rovnice (2.1) je pak [12]

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_1} \log \frac{h_L^2}{h_1 u t}. \quad (2.5)$$

K získání výšky oxidu na rychlosti hrotu je nutno vyjádřit čas, po který je oxidována čára o délce l při rychlosti v

$$t = \frac{l}{v}. \quad (2.6)$$

Souvislost mezi výškou oxidu a rychlostí hrotu je dána vztahem [12]

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_1} \log v + \frac{1}{h_1} \log \frac{h_L^2}{h_1 u t}. \quad (2.7)$$

Pro konstantní rychlost hrotu pak dostaneme [12]

$$h = \frac{\frac{qa'}{kT}}{\log\left(\frac{h_L^2 vkT}{ulqa'}\right) - \log U} U. \quad (2.8)$$

Platí-li, že $\log\left(\frac{h_L^2 vkT}{ulqa'}\right) \gg \log U$, což je ve většině případů splněno, dá se pak vztah (2.8) aproximovat na [12]

$$h = \frac{\frac{qa'}{kT}}{\log\left(\frac{h_L^2 vkT}{ulqa'}\right)} U. \quad (2.9)$$

Tento model vysvětluje závislost výšky oxidové vrstvy na velikosti přiloženého napětí, která je lineární, a na rychlosti hrotu, která je úměrná $\frac{1}{\log v}$. Různé výzkumné skupiny nezávisle na sobě potvrdily lineární závislost výšky oxidu na přiloženém napětí. Ale jejich názory na závislost výšky oxidu na rychlosti hrotu se však liší. Navrhují závislosti ve tvaru $\log \frac{1}{v}$, $\frac{1}{v^2}$ nebo $\frac{1}{v^4}$. Tyto závěry jsou většinou odvozeny pouze experimentálně z naměřených dat a nejsou podloženy žádnou teoretickou analýzou. Nezodpovězenou otázkou také zůstává velikost prahového napětí v závislosti na zastoupení příměsí v substrátu nebo relativní vlhkosti okolního prostředí [12].

Jinou závislost rychlosti růstu oxidové vrstvy pozorovali Avouris, Hertel a Martel [15]. Jejich experimentálními datům odpovídá lépe model, ve kterém je rychlost růstu oxidové vrstvy na křemíku úměrná [15]

$$\frac{dh}{dt} = u \exp\left(\frac{-h}{L_c}\right), \quad (2.10)$$

kde konstanta oxidačního procesu $L_c \cong 1$ nm. Tato odchylka od Cabrerovy-Mottovy teorie má být způsobena lokálním napětím v oxidové vrstvě [15]. Velká napětí jsou vytvářena objemovými poruchami mezi SiO_2 a okolním neoxidovaným křemíkem. Elektrické pole mezi hrotem a vzorkem tak nejen vyvolává samotný proces oxidace, ale přispívá i k napěťové relaxaci na povrchu.

Kapitola 3

Experimentální výsledky

K přípravě nanostruktur pomocí lokální anodické oxidace a při samotném zobrazování byly používány hroty uvedené v dodatku.

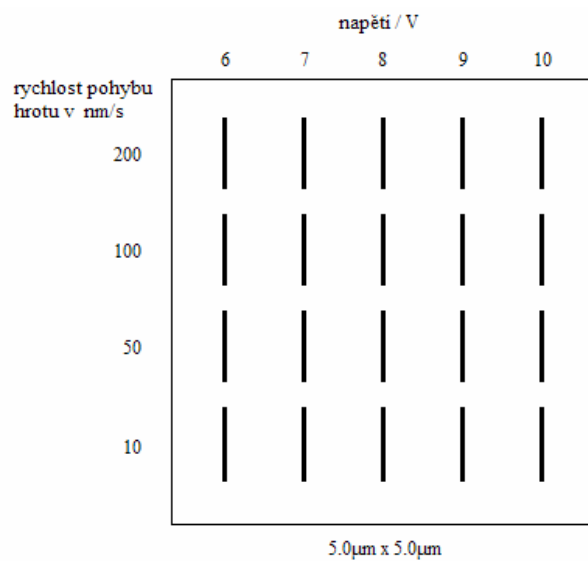
V průběhu oxidace je vzorek připojen ke kladné větvi regulovatelného zdroje napětí s rozsahem $0 \div 10$ V (součást mikroskopu AutoProbe CP-R). Dále je na AFM mikroskop instalováno zařízení, které dovoluje kontrolovat teplotu a relativní vlhkost během oxidačního procesu. Po samotné oxidaci byl pak vzorek změřen buď stejným hrotem nebo hrotem jiným, v kontaktním (C-AFM) i v bezkontaktním módu (NC-AFM).

3.1 Vytváření oxidových nanostruktur na Si(111)

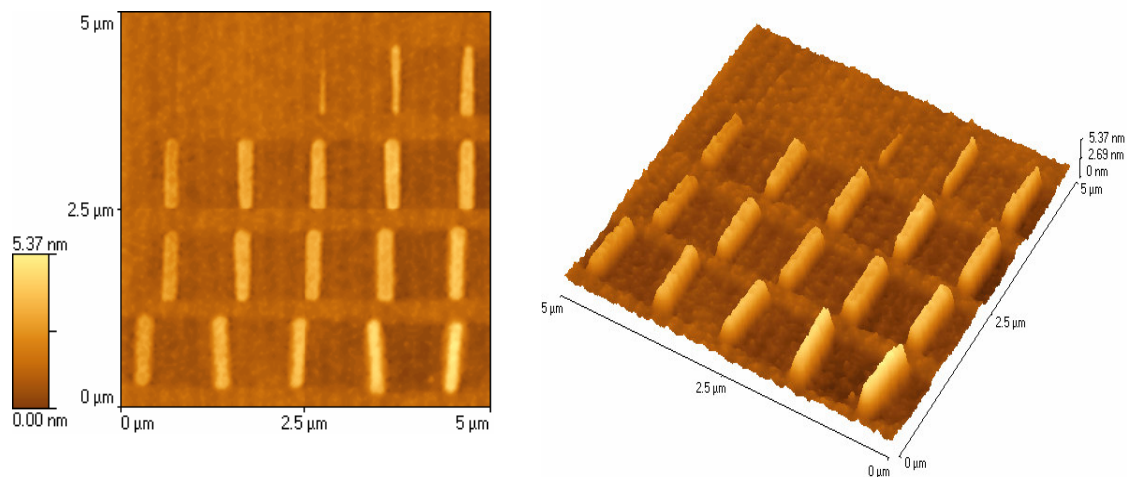
Cílem těchto experimentů bylo zjistit závislosti šířky a výšky vyoxidovaných struktur na různých parametrech oxidace, a to jak na různém napětí, tak na odlišných rychlostech oxidace. Tyto struktury byly vytvářeny při teplotě $21 \div 23$ °C a relativní vlhkosti $37 \div 52$ % pomocí hrotu CSG 10 Au. Parametry vzorku: Si(111) dopován fosforem, polovodič typu N, měrný odpor $\rho = 0,02 \div 0,05$ Ω·cm. Oxidační motiv je zobrazen na obr. 3.1. Těsně před samotnou oxidací byl pak povrch vzorku ošetřen následujícím postupem:

- deionizovaná voda,
- buffered HF (4 ml 40% HF + 20 ml NH₄HF) 2 min,
- deionizovaná voda,
- NH₄HF (ohřev 120 °C) 0,5 min,
- deionizovaná voda,
- N₂.

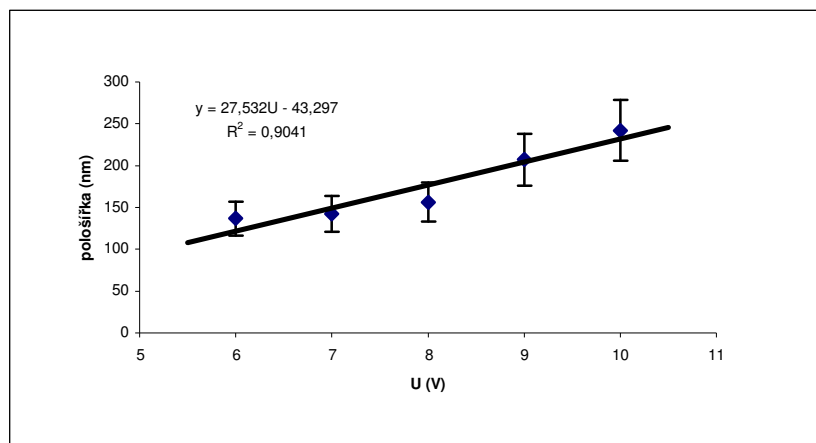
Vyoxidované struktury pak byly zobrazeny v kontaktním módu pomocí hrotu CSG 10 a CSG 10 Au, a to hrotem použitým při samotné oxidaci i hrotem zcela novým. V bezkontaktním módu pak hrotem NSG 10. Nejlepšího zobrazení bylo dosaženo pomocí hrotu NSG 10 (obr. 3.2). Pomocí tohoto obrázku pak byla vyhodnocena veškerá data, která byla následně graficky zpracována do závislostí pološířek a výšek oxidových čar při měnícím se napětí na různých rychlostech oxidace (obr. 3.3a) - d) a obr. 3.4a) - d).



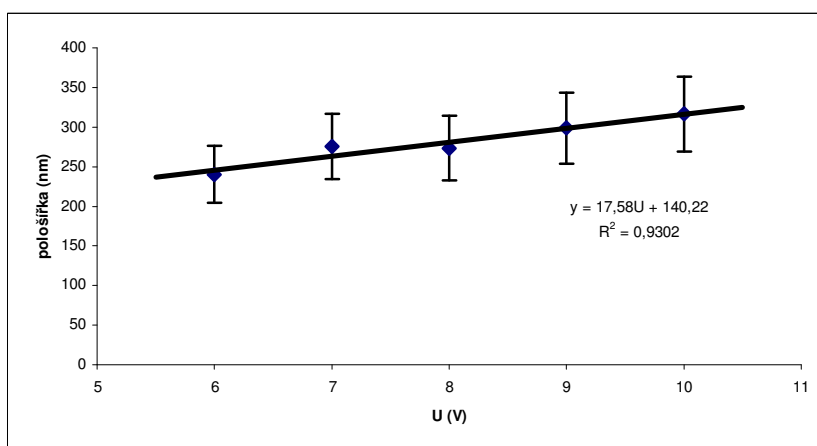
Obrázek 3.1: Předloha LAO na povrchu Si(111).



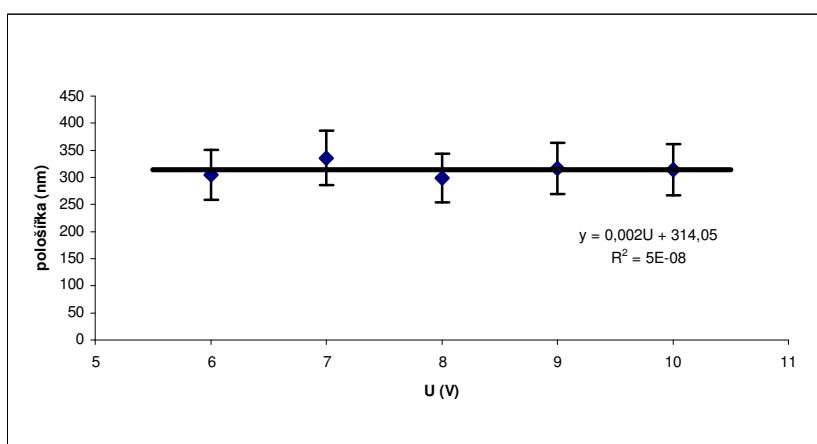
Obrázek 3.2: Oxidové čáry vytvořené pomocí LAO dle předlohy (viz. obr. 3.1).



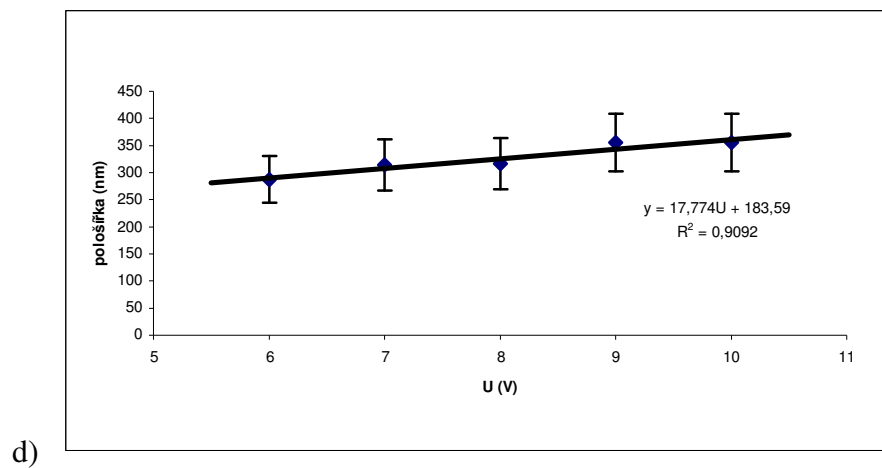
a)



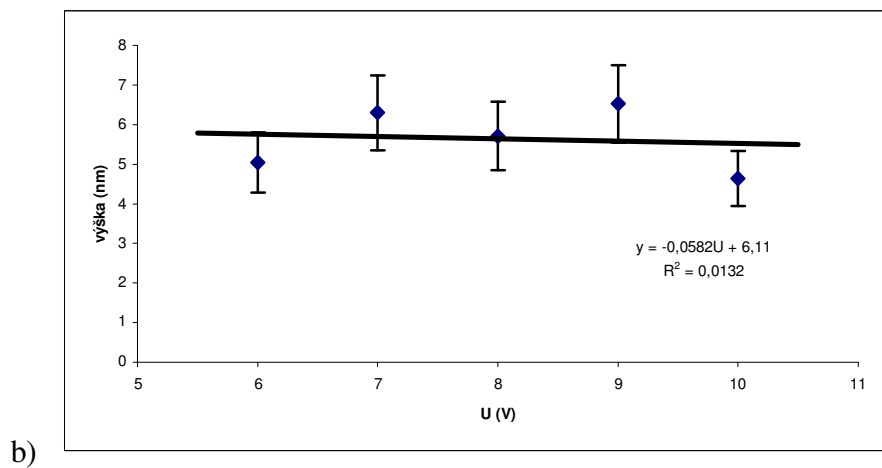
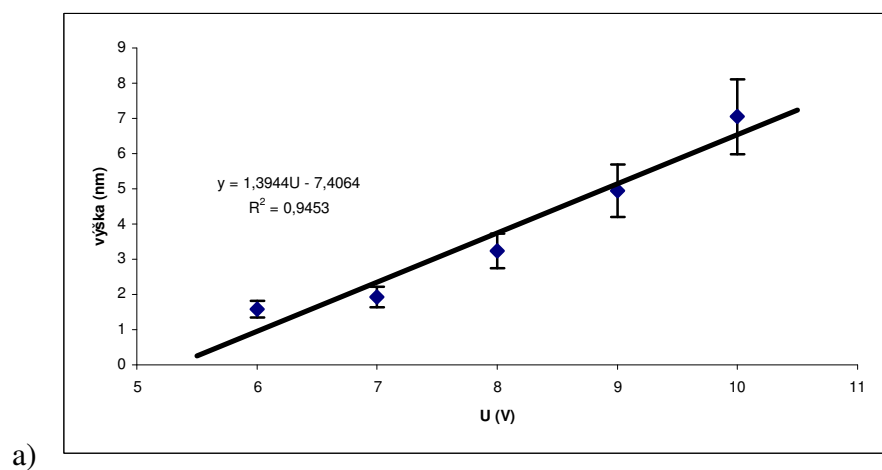
b)

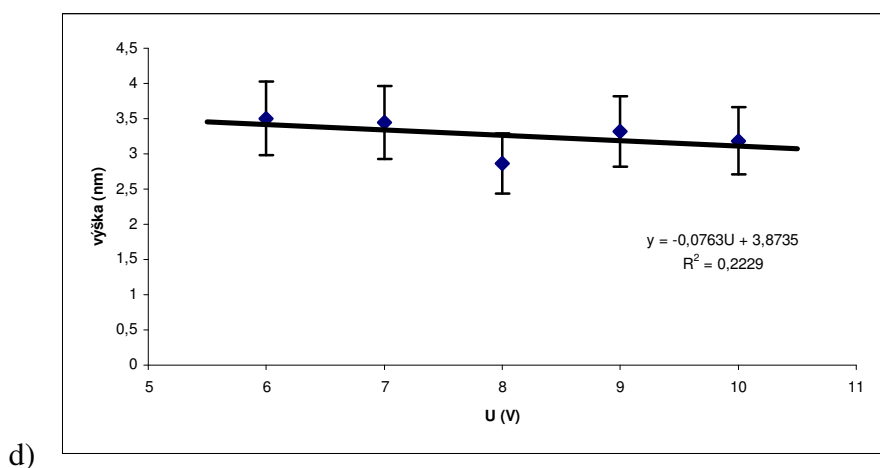
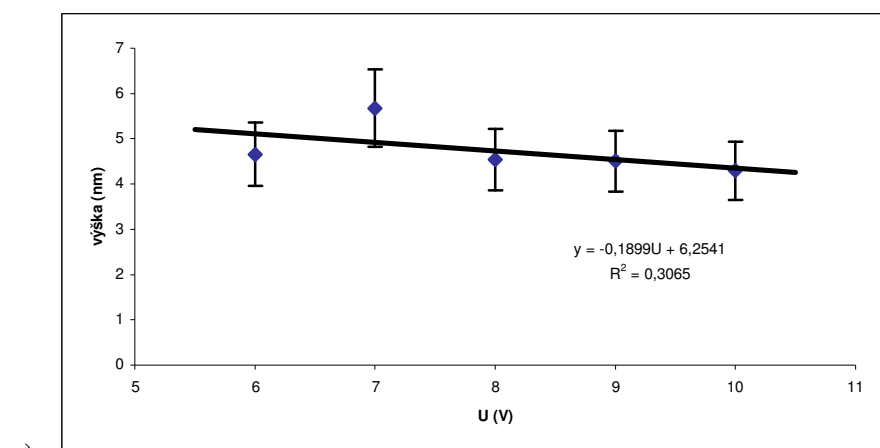


c)



Obrázek 3.3: Pološifka vyoxidované čáry v závislosti na napětí při rychlosti oxidace
a) $v = 200$ nm/s, b) $v = 100$ nm/s, c) $v = 50$ nm/s, d) $v = 10$ nm/s.





Obrázek 3.4: Výška vyoxidované čáry v závislosti na napětí při rychlosti oxidace a) $v = 200$ nm/s, b) $v = 100$ nm/s, c) $v = 50$ nm/s, d) $v = 10$ nm/s.

S hrotem CSG 10 Au se podařilo vytvářet oxidové čáry, jejichž minimální šířka byla 97 nm a výška 1 nm. Hodnota maximální šířky byla 410 nm a výšky 8 nm. Vzhledem k poloměru použitého hrotu (35 nm) je to pro šířku relativně hodně.

Zkušenosti z těchto experimentů byly použity dále pro výrobu oxidových nanostruktur pro experimenty selektivního růstu.

3.2 Selektivní růst Co a Ga na oxidových nanostrukturách na Si(111)

Další část experimentálních výsledků se týká studia povrchů, na které byly pomocí lokální anodické oxidace vytvořeny určité struktury. Následně pak bylo na povrchy těchto vzorků nadeponováno⁴ galium nebo kobalt a pozoroval se jejich selektivní růst. Selektivní růst Co

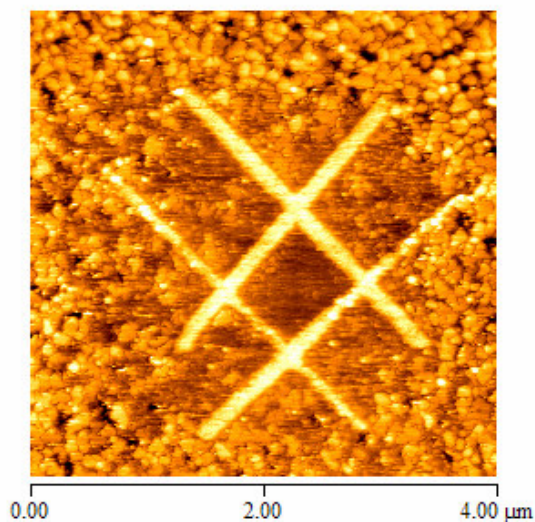
⁴ Depozice je chemický proces využíváný pro přípravu tenkých vrstev, který probíhá za vysoké teploty. Při tomto procesu se často uvolňují vedlejší produkty, které jsou z reakčního prostoru odstraňovány např. vakuem.

byl studován vzhledem k jeho magnetickým vlastnostem a selektivní růst Ga pro následné studium plazmonů. Depozice Co se prováděla ve vakuové komoře při tlaku $5 \cdot 10^{-7}$ Pa a teplotě 450 °C, v případě Ga pak při stejném tlaku a teplotě 350 °C. Před samotnou depozicí byl vzorek zahříván po dobu 20 minut při teplotě 550 °C (flashování) (nepublikované výsledky Ing. Miroslava Kolíbala).

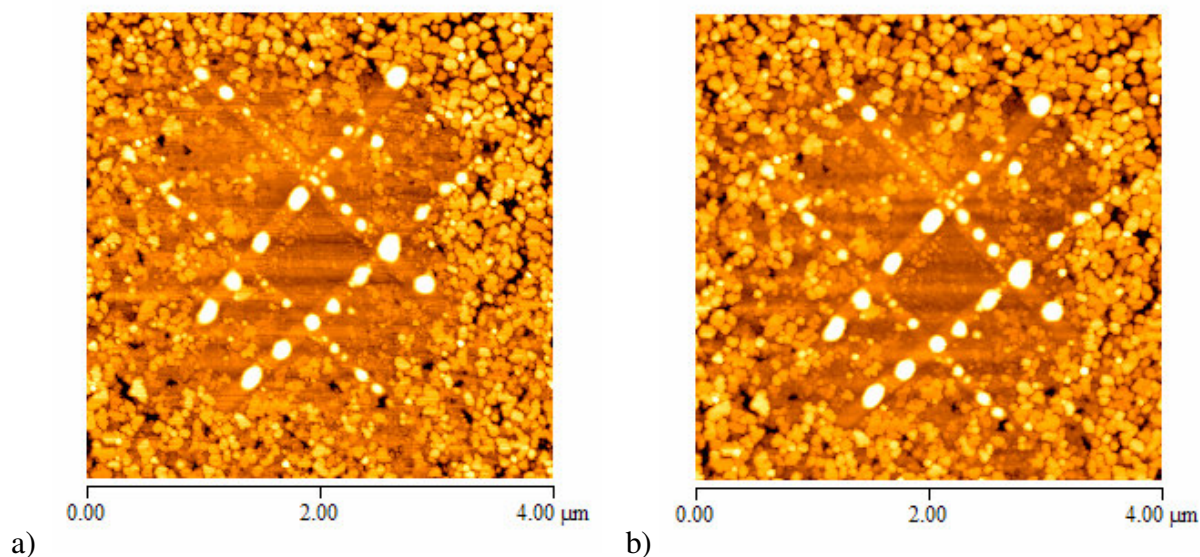
Při studiu selektivního růstu Co byl použit Si(111) dopovaný P, polovodič typu N s měrným odporem $\rho = 0,02 \div 0,05 \text{ } \Omega\text{-cm}$ a byl pasivován následujícím postupem:

- deionizovaná voda,
- buffered HF (4 ml 40% HF + 20 ml NH_4HF) 2 min,
- deionizovaná voda,
- NH_4HF (ohřev 120 °C) 0,5 min,
- deionizovaná voda,
- N_2 .

Oxidace byla prováděna pomocí hrotu CSG 10 Au. Parametry byly následující: $U = 10 \text{ V}$, $v = 50 \text{ nm/s}$, $T = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, $RH = 41 \text{ } \%$. Topografie vyoxidované struktury byla zobrazena pomocí stejného typu hrotu, jakého bylo použito při oxidaci.



Obrázek 3.5: Topografie získaná v bezkontaktním módu pomocí hrotu NSG 10 v krátké době po depozici Co. Na samotném oxidu se žádné útvary nadeponovaného Co nevyskytují.



Obrázek 3.6: Topografie v bezkontaktním módu pomocí hrotu NSG 10 a) 5 dnů po depozici, b) 14 dnů po depozici. Velikost ostrůvků zůstává s časem nezměněna. Jejich průměrná výška je 23 nm a průměr 247 nm.

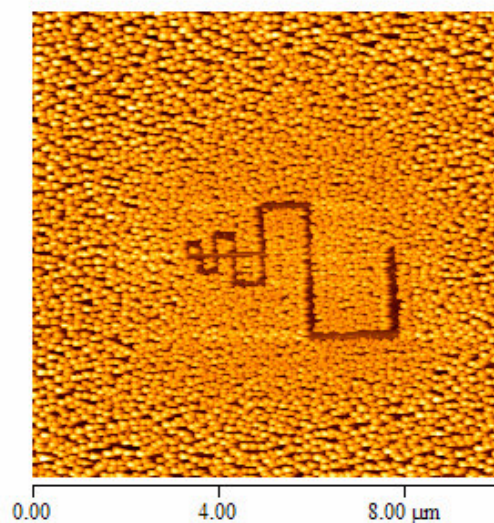
Kobalt se choval tak, že v blízkosti vyoxidované struktury byl méně nahuštěn a na samotném oxidu žádný Co pozorován nebyl (obr. 3.5). Později se však Co přeskupil tak, že vytvořil na oxidu pravidelné útvary (ostrůvky). Po delší době se však tento proces ustálil a velikost těchto útvarů již zůstala s časem nezměněna (obr. 3.6).

Nadeponovaný kobalt náhodně migruje po povrchu vzorku. Pokud při této migraci „narazí“ na oxid, zvýší se pravděpodobnost jeho vypaření. Proto v okolí vyoxidované nanostruktury pozorujeme menší hustotu ostrůvků Co než jinde na vzorku. Vznik pravidelných ostrůvků na oxidové nanostruktuře, který byl pozorován po delší době, neumíme vysvětlit.

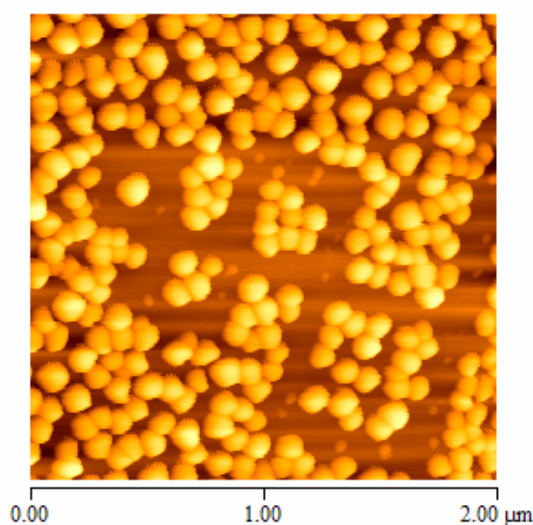
Galium po depozici na povrch Si(111) formuje při vyšších teplotách ostrůvky [28]. Velikost těchto ostrůvků je možné ovlivňovat parametry depozice. Uspořádání ostrůvků je náhodné. Při selektivním růstu Ga na oxidových nanostrukturách vytvořených LAO je možné docílit toho, aby ostrůvky přednostně rostly na určitých místech. Přitom se využívá toho, že Ga deponované za teploty vyšší než 300 °C přednostně roste na neoxidovaných místech. Cílem experimentu bylo zjistit, jak se vyvíjí objem (resp. počet ostrůvků) deponovaného Ga, jestliže omezíme oxidovými bariérami plochu možného růstu. Za tímto účelem byly vytvořeny dvě struktury.

Na obr. 3.7 je zachycena první struktura ve tvaru Asklepiovy hole. Tato struktura je tvořena postupně se zmenšujícími čtverci o rozměrech (nm²): 250 x 250, 300 x 300, 400 x 400, 550 x 550, 1000 x 1000, 1750 x 1750. Její přednost spočívá v tom, že je možné ji vytvořit jako jedinou uzavřenou křivku. Jako vzorek byl použit Si(111) dopovaný P, polovodič typu N s měrným odporem $\rho = 0,02 \div 0,05 \text{ } \Omega\cdot\text{cm}$ a byl pasivován stejným postupem jako v případě selektivního růstu Co. Oxidace byla prováděna pomocí hrotu CSG 10 Au a parametry oxidace byly následující: $U = 10 \text{ V}$, $v = 100 \text{ nm/s}$, $T = 26 \text{ } ^\circ\text{C}$, $RH = 43 \text{ } \%$. Po depozici, bylo pozorováno, že nadeponované Ga bylo více nahuštěno v blízkosti vyoxidované nanostruktury (obr. 3.7). Ovšem výraznější změny velikostí ostrůvků

nadeponovaného Ga v uzavřených strukturách samotného oxidu pozorovány nebyly (obr. 3.8).

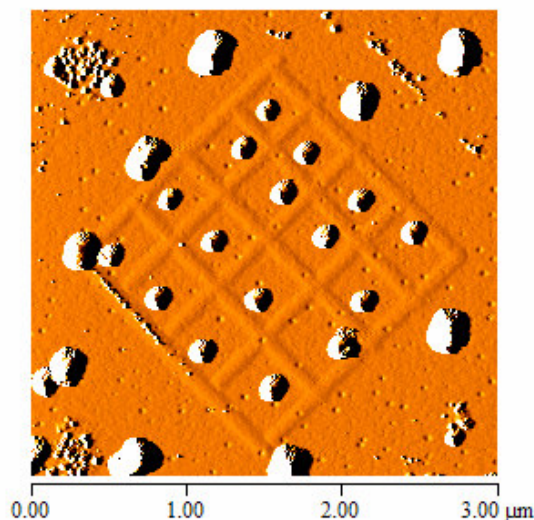


Obrázek 3.7: Obrázek pořízený v bezkontaktním módu pomocí hrotu NSG 10. Galium je nahuštěno v blízkosti vyoxidované nanostruktury.



Obrázek 3.8: Topografie pořízená v bezkontaktním módu pomocí hrotu NSG 10. Velikost ostrůvků Ga uvězněných uvnitř vyoxidované struktury zůstává prakticky nezměněna.

Druhá struktura, na které byly zkoumány velikosti ostrůvků Ga, měla tvar odstupňované mřížky a byla vytvořena pomocí LAO na stejném vzorku jako v předchozím případě, přičemž povrch vzorku byl pasivován stejným způsobem. Velikosti jednotlivých políček se měnily, a to od 350×350 až po 500×500 (nm²). Oxidace byla prováděna pomocí hrotu CSG 10 Au a parametry oxidace byly následující: $U = 10$ V, $v = 200$ nm/s, $T = 26$ °C, $RH = 47$ %. V tomto případě bylo pozorováno, že po depozici se v každém jednotlivém políčku vyoxidované mřížky vyskytuje pouze jeden ostrůvek Ga (obr. 3.9).

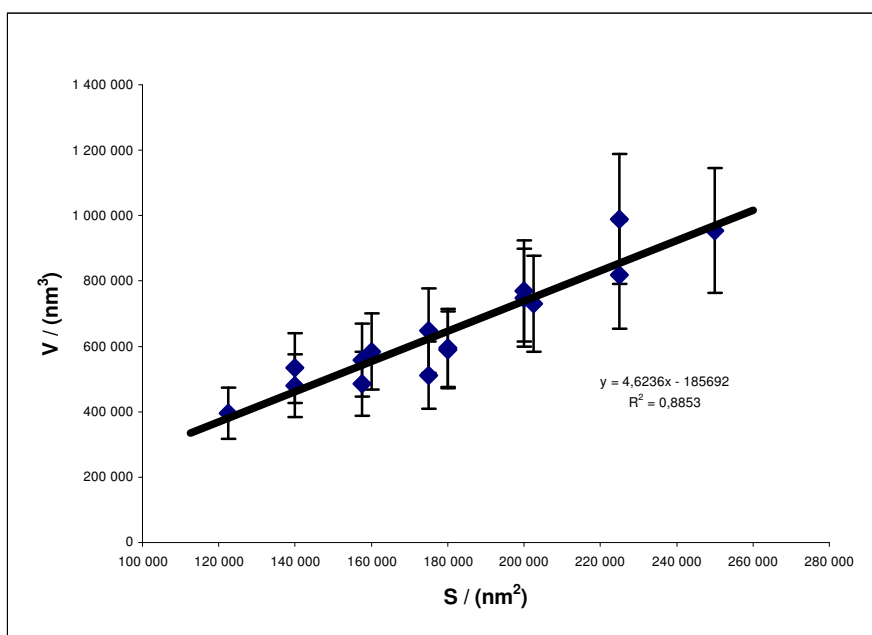


Obrázek 3.9: Obrázek pořízený v bezkontaktním módu pomocí hrotu NSG 10. Z obrázku je patrné, že velikost uvězněných ostrůvků se mění s velikostí jednotlivých políček.

Z velikosti korelačního koeficientu R^2 je patrné, že regresní přímka, proložená experimentálně získanými daty, poměrně dobře vystihuje závislost velikosti uvězněného ostrůvku Ga na velikosti plochy políčka (obr. 3.10).

Z experimentů je zřejmé, že růst Ga ostrůvků ovlivňuje povrchová difúze. S větší plochou nejprve narůstá velikost ostrůvků, až dosáhne určité kritické hodnoty, a poté již dochází k růstu více ostrůvků.

Experimenty názorně demonstrují možnosti selektivního růstu při ovlivnění velikosti a uspořádání Ga ostrůvků.



Obrázek 3.10: Velikost objemu nadeponovaného Ga v závislosti na velikosti plochy políčka vyoxidované nanostruktury.

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá přípravou nanostruktur pomocí metody AFM s využitím lokální anodické oxidace (LAO). Všechna topografická měření i samotná příprava nanostruktur byla prováděna na mikroskopu AutoProbe CP-R zakoupeného na Ústav fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně v roce 2002.

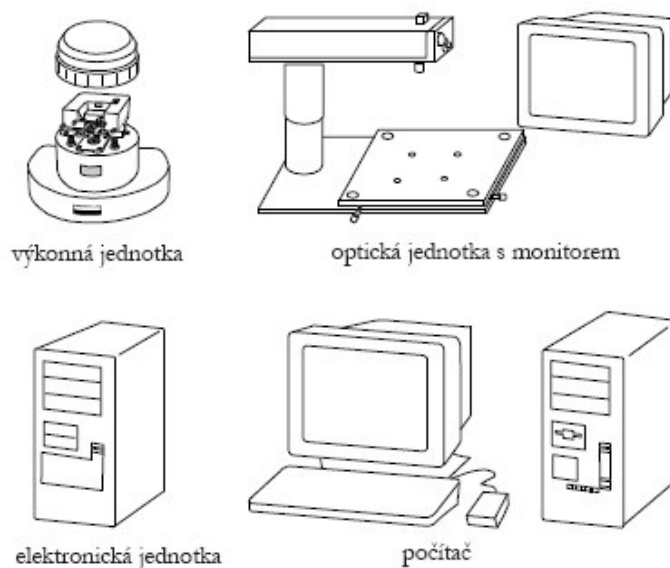
Při studiu oxidace na Si(111) byly stanoveny závislosti rozměrů oxidových nanostruktur na různých napětích a rychlostech oxidace. Závislosti výšky a pološifky na napětí měly rostoucí tendenci. Závislosti těchto parametrů na rychlostech měly spíše konstantní až klesající charakter.

Další experimenty se týkaly selektivního růstu, speciálně pak selektivního růstu Co a Ga na Si(111). Bylo zjištěno, že Co se po depozici vyskytuje s menší hustotou právě v okolí oxidových nanostruktur. Ga se v těchto oblastech vyskytovalo naopak hustěji. Dále bylo pozorováno, že po určité době se přítomný Co z okolí vyoxidované struktury přesunul na samotný oxid, ale v průběhu času se již dále nepřesouval a výsledná struktura zůstávala za pokojových teplot stabilní. V případě Ga byl pozorován pravý opak. Ga se na oxidu nevyskytovalo. Byla ale pozorována jiná skutečnost, a to taková, že v případě uvěznění jednotlivých ostrůvků nadeponovaného Ga se jejich velikost, resp. objem, v závislosti na velikosti plochy uzavřené vyoxidované struktury zvětšovala. Z podrobnějšího zkoumání se pak tato závislost jeví jako lineární.

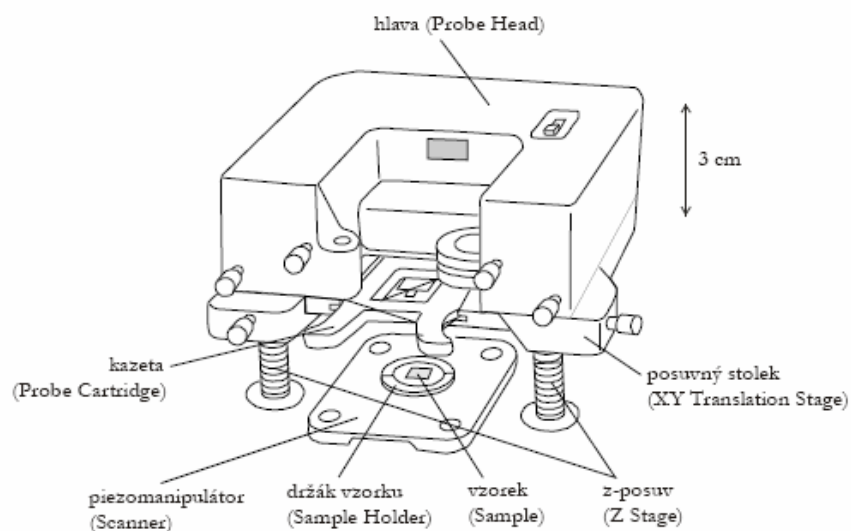
Uvedené zkušenosti, získané při studiu selektivního růstu, mohou být dále využity, především pro výrobu polí ostrůvků Ga při studiu plazmonů.

Dodatky

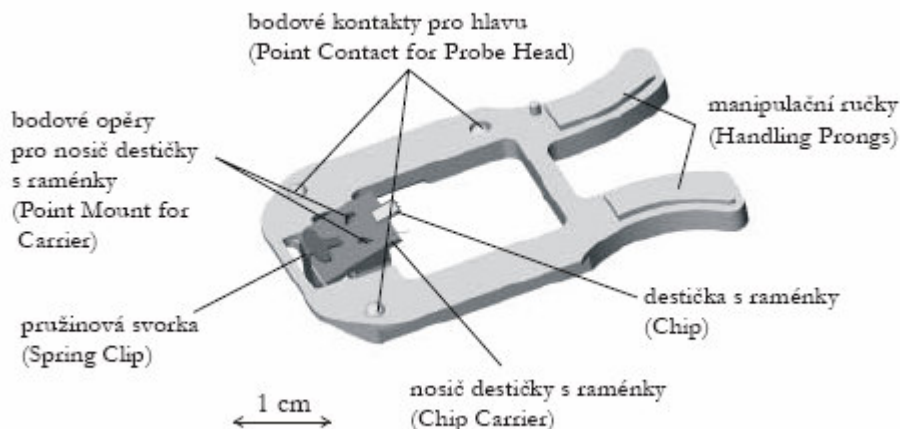
Konstrukční uspořádání mikroskopu AutoProbe CP-R



Obrázek 5.1: Systémové komponenty SPM mikroskopu CP-R [4].



Obrázek 5.2: Schéma hlavy s uchycením hrotu mikroskopu CP-R [4].



Obrázek 5.3: Schéma kazety s pozicí uložení destičky s hroty mikroskopu CP-R [4].

Parametry použitých hrotů

V následující tabulce jsou uvedeny parametry všech hrotů, které byly použity při studiu a přípravě nanostruktur pomocí mikroskopu AutoProbe CP-R v této bakalářské práci. Všechny hroty jsou od stejného výrobce NT-MDT.

Hrot	Tuhost raménka (N/m)	Rezonanční kmitočet (kHz)	Poloměr křivosti hrotu (nm)	Výška hrotu (μm)
CSG 10	0.1	20	10	10-15
CSG 10 TiN	0.1	20	35	10-15
CSG 10 Au	0.1	20	35	10-15
NSG 10	11.5	255	10	10-15
DCP 20	48	420	50-70	10-15

Tabulka 5.1: Tabulka použitých hrotů.

Literatura

- [1] R. Wiesendanger: *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Methods and Applications*, Cambridge University Press, 1998
- [2] E. Meyer, H. J. Hug, R. Bennewitz: *Scanning Probe Microscopy – The Lab on a Tip*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004
- [3] G. Binnig, C. F. Quate, and Ch. Gerber: *Phys. Rev. Lett.* 56, 930, 1986
- [4] M. Bartošík: *Aplikace AFM/STM v oblasti nanotechnologií*, diplomová práce, VUT FSI v Brně, Ústav fyzikálního inženýrství, 2003
- [5] *AutoProbe CP-Research User's guide, Part I*, TM Microscopes Company, 2001
- [6] Internetové stránky: <http://www.veeco.com>, 21.3. 2008
- [7] J. N. Israelachvili: *Intermolecular and Surface Forces*, 2nd ed., Academic Press Ltd., 1994
- [8] D. Sarid: *Scanning Force Microscopy*, Optical Science Center, Oxford University Press, revise edition, 1994
- [9] R. Kalousek: *In-situ monitorování povrchů pevných látek modifikovaných iontovými svazky metodou SFM/STM v podmínkách ultravakua*, diplomová práce, VUT FSI v Brně, Ústav fyzikálního inženýrství, 1996
- [10] *AutoProbe CP-Research User's guide, Part II*, TM Microscopes Company, 2001
- [11] J. A. Dagata a kol.: *Modification of hydrogen-passived silicon by a scanning tunneling microscope operating in air*, Appl. Phys. Lett., Vol. 56, 1990
- [12] D. Stiévenard, P. A. Fontaine, E. Dubios: *Nanooxidation using a scanning probe microscope: An analytical model based on field induced oxidation*, Appl. Phys. Lett., Vol. 70, 1997
- [13] X. N. Xie, H. J. Chung, C. H. Sow, A. T. S. Wee: *Nanoscale material patterning and engineering by atomic force microscopy nanolithography*, Mat. Sci. And Eng., 2006
- [14] V. Cambel, J. Martaus, J. Šoltýs, R. Kúdela, D. Gregušová: *AFM nanooxidation process – Technology perspektive for mesoscopic structures*, Surf. Sci., (Vol. nepřiděleno), 2006
- [15] P. Avouris, T. Hertel, R. Martel: *Apl. Phys. Lett.* 71 (2), 285, 1997
- [16] Internetové stránky: <http://www.ntmdt-tips.com>, 27.3. 2008
- [17] S. Gwo: *Scanning probe oxidation of Si₃N₄ masks for nanoscale lithography, micromachining, and selective epitaxial growth on silicon*, J. Phys. Chem. Sol., 62, 2001
- [18] J. Červenka: *Aplikace rastrovací sondové mikroskopie v oblasti nanotechnologií*, diplomová práce, VUT FSI v Brně, Ústav fyzikálního inženýrství, 2004
- [19] Encyklopedie Wikipedia: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Depozice>, 28.3. 2008
- [20] B. Rezek, C. Sauerer, J. A. Garrido: *Scribing into hydrogenated diamond surfaces using atomic force microscopy*, Appl. Phys. Lett. 82, 19, 2003
- [21] I. Brodie, J. J. Muray: *The Physics of Micro/Nanofabrication*, Springer, 1993

- [22] J. Červenka, R. Kalousek, M. Bartošík, D. Škoda, O. Tomanec, and T. Šíkola: *Fabrication of nanostructures on Si(100) and GaAs(100) by local anodic oxidation*, přijato do Appl. Surf. Sci. 253, 2006
- [23] Encyklopedie Wikipedia: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Adsorbce>, 28.3. 2008
- [24] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker: *Fyzika, Část 5 Moderní fyzika*, Vutium 2000
- [25] M. Shibata, S. S. Stoyanov, M. Ichikawa: *Selective growth of nanometer-scale Ga dots on Si(111) surface windows formed in an ultrathin SiO₂ film*, Phys. Rev. B, 59, 1999
- [26] M. Zapletal: *Příprava nanostruktur pomocí metody AFM*, diplomová práce, VUT FSI v Brně, Ústav fyzikálního inženýrství, 2007
- [27] J. Čechal, M. Kolíbal, P. Kostelník, T. Šíkola: *Gallium structure on the Si(111)-(7 x 7) surface: influence of Ga coverage and temperature*, Journal of Physics: Condensed Matter, Vol.19, 2007, No.1